1961—2020年宁夏干旱事件年代际变化及风险评估

王 岱[1,2]， 崔 洋[1,3]， 王素艳[1,2]， 张 雯[1,2]

（1. 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室，宁夏 银川 750002；
2. 宁夏回族自治区气候中心，宁夏 银川 750002；3. 宁夏回族自治区气象科学研究所，宁夏 银川 750002）

摘 要：利用1961—2020年宁夏20个国家气象站气象观测资料，结合近40 a宁夏社会经济统计数据，建立宁夏干旱过程事件指标，并基于灾害风险评估理论建立宁夏年代际干旱灾害风险评估模型，分析宁夏干旱事件和主要农作物干旱灾害风险的年代际变化特征和区域差异性，并探讨造成区域农作物年代际风险变化的可能影响因素。结果表明：（1）近60 a宁夏干旱事件的累积效应、持续时间以及强度指标具有明显的年代际变化特征，宁夏中北部和南部山区分别在1980年和2010年前后出现趋势和均值的突变；干旱事件指标及致灾危险性指标大值区空间范围均呈现出增加–减少–增加–减少的变化特征。（2）20世纪80年代以来，宁夏不同地区玉米干旱灾害风险等级依次为引黄灌区>中部干旱带>南部山区，受玉米种植面积不断扩大和国内生产总值（GDP）持续增加影响，在中南部地区其干旱风险呈逐年代际增大趋势；小麦干旱灾害风险增加幅度为中部干旱带>南部山区>引黄灌区，致灾危险性、小麦种植面积及GDP等级较高是2010s中部干旱带部分地区干旱风险增大的主要原因。（3）面对未来宁夏中南部地区水资源短缺和灌溉用水不足的挑战，建议通过提高人工增雨能力、开发种植品种、退耕或移民等措施，减少干旱致灾危险性、孕灾环境脆弱性和承灾体暴露度，从而降低当地玉米和小麦的干旱灾害风险等级。研究结果可为地方科学规划农业生产、高效利用水资源、抗旱救灾等提供科学理论依据，促进宁夏黄河流域生态保护和高质量发展先行区建设。

关 键 词：干旱事件；年代际变化；灾害风险评估；宁夏
文章编号：1000－6060(2024)05－0785－13(0785～0797)

干旱是一种全球普遍发生的气象灾害，会给人类社会经济发展造成严重影响[1]，严重干旱往往造成生态环境恶化、饥荒、战乱、朝代变迁等灾难[2-3]。近50 a来全球极端干旱事件发生频率显著增加[4-5]，中国北方地区发生半年以上时间尺度干旱的频率较高，干旱程度亦在不断加剧[6-8]。联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）第六次评估报告指出，随着现有排放情景下全球地表温度的持续升高[9]，中国南北方的干旱分布格局已然发生了新的变化[10-12]。伴随着经济社会的快速发展，干旱灾害风险正在成为一种新的气候常态，对国民经济特别是农业生产造成的影响愈加严重[13]。20世纪60年代以来，西北地区东部呈变干趋势，轻到中旱增多[14]。受区域年降水总量小且时空变率大等因素影响[15]，中国夏季风边缘区属于干旱灾害高风险区。黄河流域中上游地区干旱成因复杂、地带性变化特征显著[16]。同时，全球和区域气候变化能通过多途径影响西北干旱的发生发展过程，进而引起其分布特征及风险影响发生变化。鉴于干旱问题的复杂性和明显的地域性特征，对宁夏干旱变化进行专门研究具有重要意义。

干旱灾害对人类社会的经济生活和财产安全，

收稿日期：2023-09-19； **修订日期**：2023-11-20
基金项目：宁夏自然科学基金项目(2023AAC03792，2022AAC05065)；中国气象局创新发展专项（CXFZ2024J043，CXFZ2023J052）；第七批自治区青年科技人才托举工程项目资助
作者简介：王岱（1990–），女，硕士，工程师，主要从事气候变化及气象灾害风险研究. E-mail: wangd123@126.com
通讯作者：崔洋（1982–），男，博士，正高级工程师，主要从事气候与气候变化研究. E-mail: cuiyang@cma.gov.cn

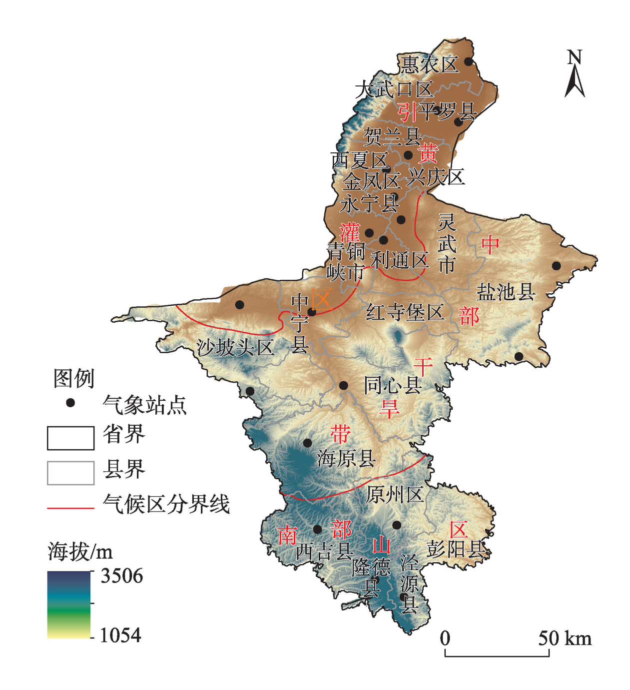
特别是农业生产生活有巨大的危害。据应急管理部发布的2022年全国自然灾害基本情况的统计显示，2022年全国因干旱共有5245.2×10⁴人次受灾，6090.2×10³ hm²农作物受灾，直接经济损失512.8×10⁸元。宁夏地处中国内陆腹心和西部前缘、黄河中上游和夏季风边缘地区，生态环境脆弱。全区干旱具有发生次数多、影响范围广、危害性大的特点，素有“三年两头旱，五年一小旱，十年一大旱”的说法[17]。由于影响物理因子杂多，宁夏干旱演变规律、成因机理极为复杂[18]。1981—2010年宁夏干旱日数呈增加趋势，干旱致灾危险性从南到北呈不断加剧趋势[19]，气候暖干化是造成该时段宁夏强干旱事件增多的主要原因[20]。宁夏干旱以春季和夏季为主，各季节干旱强度均呈增强趋势[21-22]。宁夏年干旱事件在20世纪80年代中期发生过一次突变[23]，具有21 a尺度长周期变化，受大气环流和厄尔尼诺等因素影响具有3~7 a的短周期变化[24]。受限于长序列和高精度气象、人口、社会经济等数据获取困难，对宁夏干旱事件过程年代际变化及其影响风险评估研究比较少。为了分析宁夏干旱事件时空演变规律，使得今后能更有效地做好抗旱减灾工作，有必要进一步深入分析宁夏干旱事件年代际变化特征及其影响风险。

本文利用宁夏地面气象观测站数据、各县(区)农作物种植面积及社会经济数据等资料，分析近60 a来宁夏干旱事件的年代际变化规律，研究干旱致灾危险性、承灾体暴露度和孕灾环境脆弱性的年代际时空演变特征，并对不同年代际背景下干旱灾害影响小麦、玉米等农作物的风险程度进行评估，深入认识宁夏干旱灾害的发生及风险影响变化规律，旨在为地方科学规划农业生产、高效利用水资源、抗旱救灾提供科学理论依据，促进宁夏黄河流域生态保护和高质量发展先行区建设。

1 资料和方法

1.1 数据来源

研究所用资料包括：1961—2020年宁夏回族自治区辖区20个国家气象站逐日气温、降水观测数据，来自于《宁夏统计年鉴》的1989—2020年宁夏22个县(区)国内生产总值(GDP)、小麦和玉米种植面积等社会统计数据。根据地形地貌和气候环境特点，将宁夏全区分为引黄灌区、中部干旱带和南部山区，各县(区)及气象站点分布如图1所示，其中兴庆区、金凤区和西夏区统称为银川市区。



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1822号的标准地图制作，底图边界无修改。下同

图1 宁夏气象站点分布及气候区划分

Fig. 1 Distribution of meteorological stations and classification of climatic zones in Ningxia

1.2 研究方法

1.2.1 干旱过程识别方法 采用国家标准《GB/T 20481-2006气象干旱等级》[25]中定义的综合气象干旱指数(CI指数)对干旱过程进行识别，该指数既能反映短时间尺度(月)和长时间尺度(季)降水量气候异常情况，也能反映短时间尺度(影响农作物)水分亏欠情况。相关研究结果表明，本地改进并优化的CI指数更符合宁夏气象干旱实际[26-27]。另外干旱过程还参考了《QX/T 597-2021区域性干旱过程监测评估方法》[28]。单站干旱过程定义如表1所示。

1.2.2 干旱致灾危险性指标计算 根据宁夏干旱灾害致灾特征，考虑干旱事件强度、持续时间等方面的影响，选取单站年干旱过程总强度、年最长干旱过程持续日数、年最强干旱过程强度为主要致灾因子建立单站干旱致灾危险性指标。

根据《QX/T 597-2021区域性干旱过程监测评估方法》[28]中对于干旱过程强度的定义，首先计算获得累积干旱过程强度 $S(n)$，计算公式如下：

表1 干旱过程识别及指标定义

Tab. 1 Drought process identification and index definition

指标名称	定义
干旱过程	当某站连续10 d以上出现轻旱及以上等级干旱，且至少有一天达到中旱及以上等级。
干旱过程开始日	干旱过程时段内第一次出现轻旱及以上等级的日期，为干旱过程开始日。
干旱过程结束日	干旱过程发生后，当连续10 d干旱等级为无旱时，则干旱过程结束，干旱过程结束前最后一天干旱等级为轻旱及以上的日期为干旱过程结束日。
干旱过程持续日数	某站干旱过程开始日到结束日（含结束日）的总天数。

$$S(n)=n^{a-1}\sum_{i=1}^{n}I_i \tag{1}$$

式中：n为某站干旱持续天数；a为权重系数，一般取0.5；I_i为第i天气象干旱指数的绝对值，$1\leq i\leq n$，轻旱以下的干旱指数记为0。

某次干旱过程强度（Z_s）一般由单站最强累积干旱过程强度决定，是在滑动干旱过程内持续干旱天数获得累积干旱强度的基础上计算得到，计算公式如下：

$$Z_s=\max_{k=1,m;\,n=1,k}\left[S(n)\right] \tag{2}$$

式中：$\max_{k=1,m;\,n=1,k}[\cdot]$为通过不断滑动比较干旱过程内从某一干旱日$k(1\leq k\leq m)$到干旱结束日时段内$n(1\leq n\leq k)$天累积干旱强度的最大值；$m$为干旱过程总天数。

单站年干旱过程总强度：年内所有干旱过程强度的总和。

单站年最强干旱过程强度：年内多个干旱过程强度中的最大值。

单站年干旱过程最长连续日数：年内所有干旱过程中，出现连续时间最长的干旱过程持续日数。

1.2.3 干旱风险评估指标确定 基于灾害风险评估原理，农作物的干旱灾害风险评估指标（RI）由致灾危险性指标（H）、承灾体暴露度指标（E）、孕灾环境脆弱性指标（V）构成，表达式为：

$$\mathrm{RI}=H\times E\times V \tag{3}$$

基于年干旱过程总强度、年干旱过程最长持续日数及年最强干旱过程强度3个致灾因子年代际均值，利用熵值法建立致灾危险性指标。熵值法是一种客观赋权方法，它通过各指标相对变化程度对系统整体的影响来决定指标的权重，能克服指标间的信息重叠，使指标权重更具客观性[29-30]。承灾体暴露度是针对受灾害影响的对象而言，主要是指受到干旱直接威胁的对象[31]，暴露程度越高，发生干旱灾害的风险越大，本文选取农作物播种面积作为承灾体暴露度指标。孕灾环境脆弱性是衡量自然环境发生灾害可能性大小和孕灾环境对干旱的适应和响应能力大小的因子[32]，亦是反映各种自然因素和社会经济因素对灾害影响的敏感度和适应能力的综合因子，故本文选取更能反映自然和社会经济因素对干旱灾害综合影响的GDP来表征孕灾环境脆弱性指标。为消除上述指标之间的量纲差异，在计算干旱灾害风险评估指标之前先进行均一化[33]处理，各年代干旱灾害风险评估指标在均一化计算时均取所有年代际中的最大值和最小值，以便于比较。

1.2.4 其他统计方法 为分析诊断干旱事件指标的变化，文中还用了滑动t检验、线性倾向估计等气候统计方法[34]。

2 结果与分析

2.1 干旱事件年际和年代际时空变化特征

强度、持续时间、累积效应对干旱灾害时空分布具有决定性影响。从逐年变化看，宁夏干旱事件虽无明显年际变化趋势，但年代际变化阶段性特征明显。1961年以来，全区年干旱过程总强度在年代际尺度上呈增强-减弱-增强-减弱-增强趋势。引黄灌区、中部干旱带分别在1977、1978年发生了一次由增强转为减弱的突变，1991—2005年呈增强趋势，2005年后呈减弱趋势（图2a~b）。南部山区年际变率较大，呈增强-减弱-增强-减弱的变化趋势，2011年发生过一次突变（图2c）。

引黄灌区和中部干旱带年干旱过程最长持续日数年代际变化与年干旱过程总强度类似（图3a~b）；南部山区最长持续日数在2006年左右发生突变，突变前年际变率较大、呈缓慢增加趋势，突变后年际变率减小、减少趋势明显（图3c）。

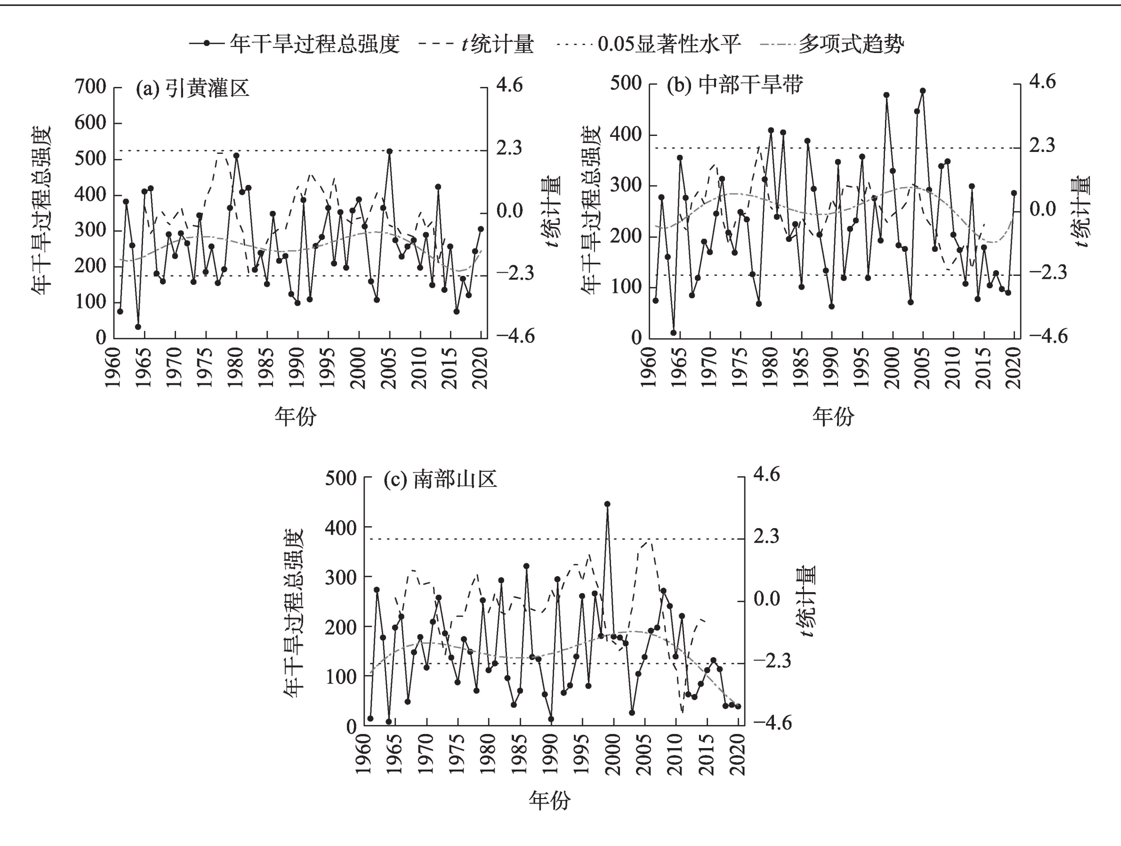


图2 宁夏气候区年干旱过程总强度变化序列及其滑动*t*检验

Fig. 2 Change sequence of annual drought process total intensity and its moving *t*-test in Ningxia climatic zones

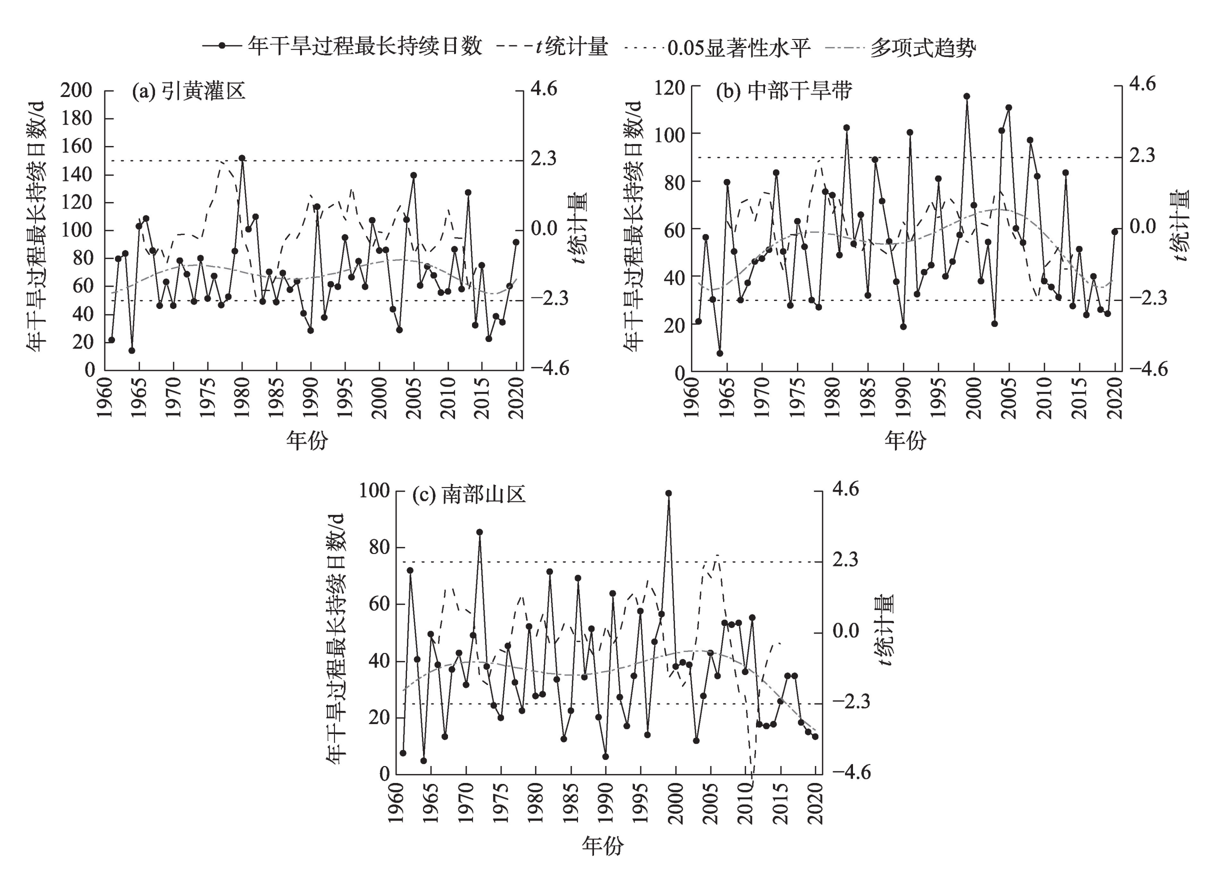


图3 宁夏气候区年干旱过程最长持续日数变化序列及其滑动*t*检验

Fig. 3 Change sequence of annual drought process longest duration days and its moving *t*-test in Ningxia climatic zones

引黄灌区年最强干旱过程强度在1980s偏弱，在1990s偏强，2005年后呈明显减弱趋势，在1982年发生过一次由强转弱的突变(图4a)。中部干旱带在2009年突变前呈增强趋势，后开始减弱(图4b)。21世纪以来，南部山区在2007—2012年发生2次突变，其中2011年由增强进入减弱阶段(图4c)。

宁夏年干旱过程总强度、年干旱过程最长持续日数、年最强干旱过程强度指标大值区域范围随着年代际演变在空间上会发生明显迁移。其中，年干旱过程总强度230以上区域在1960s主要分布在利通区以北地区，1970s向南扩展到中宁县、红寺堡区一线；1980s和1990s向北收缩到青铜峡市、利通区一线；进入2000s后再次向南向东扩大至沙坡头区、红寺堡区、盐池县一线，2010s范围再次向北收缩；其中2000s其范围最大，包括红寺堡区及以北地区。总强度在190以上的区域范围年代际南北迁移与之类似(图5)。

年干旱过程最长持续日数在70 d以上的区域范围1960s主要集中在惠农区、平罗县、贺兰县和银川市区，1970s往南增加，1980s、1990s往北缩小，进入2000s往南增加，2010s再次往北缩小；其中，2000s范围最大，包括灵武市以北地区及沙坡头区。55 d以上的区域在各年代均位于引黄灌区，范围变化不大(图6)。

年最强干旱过程强度在17以上的区域范围1960s主要集中在利通区以北地区，1970s往南增加，1980s、1990s往北缩小，2000s往南增加，2010s往北缩小；其中，2000s范围最大，包括红寺堡区及其以北区域。最强强度在15以上的区域1960s包括了海原县以北大部地区，此后逐渐向南扩大，2000s范围达到最大，2010s略往北缩小(图7)。

2.2 干旱风险评估指标年代际演变

2.2.1 干旱致灾危险性 在决定干旱致灾危险性的因子指标中，年最强干旱过程强度权重最大，各年代际在0.36~0.40之间，年干旱过程最长持续日数次之(0.32~0.35)，年干旱过程总强度最小(0.28~0.30)，所有因子指标权重年代际均变幅不大(表略)。

1960s引黄灌区致灾危险性指标在0.28~0.32之间，中部干旱带和南部山区为0.10~0.28，贺兰县最大为0.40(图8a)。1970s引黄灌区大部致灾危险性指标增大到0.28~0.40，中部干旱带致灾危险性指标0.22~0.28的区域向南扩大至海原县北部(图8b)。1980s引黄灌区致灾危险性指标0.28以上区域范围

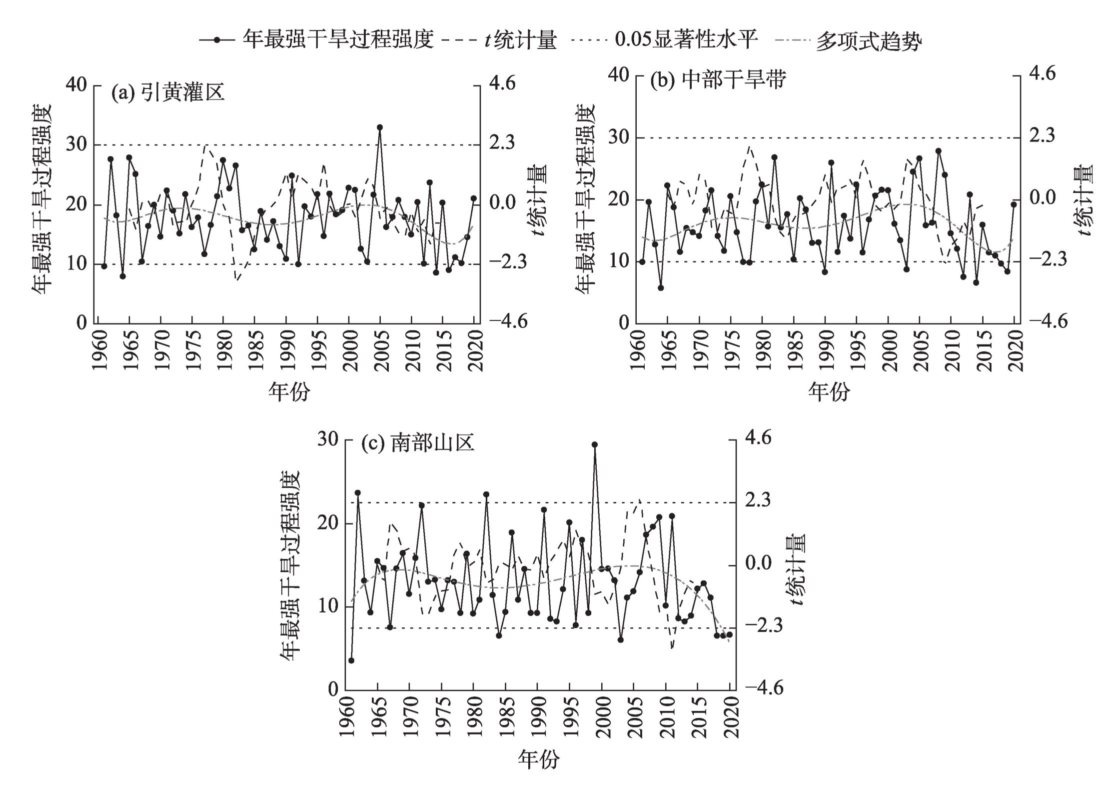


图4　宁夏气候区年最强干旱过程强度变化序列及其滑动t检验

Fig. 4　Change sequence of annual strongest drought process intensity and its moving *t*-test in Ningxia climatic zones

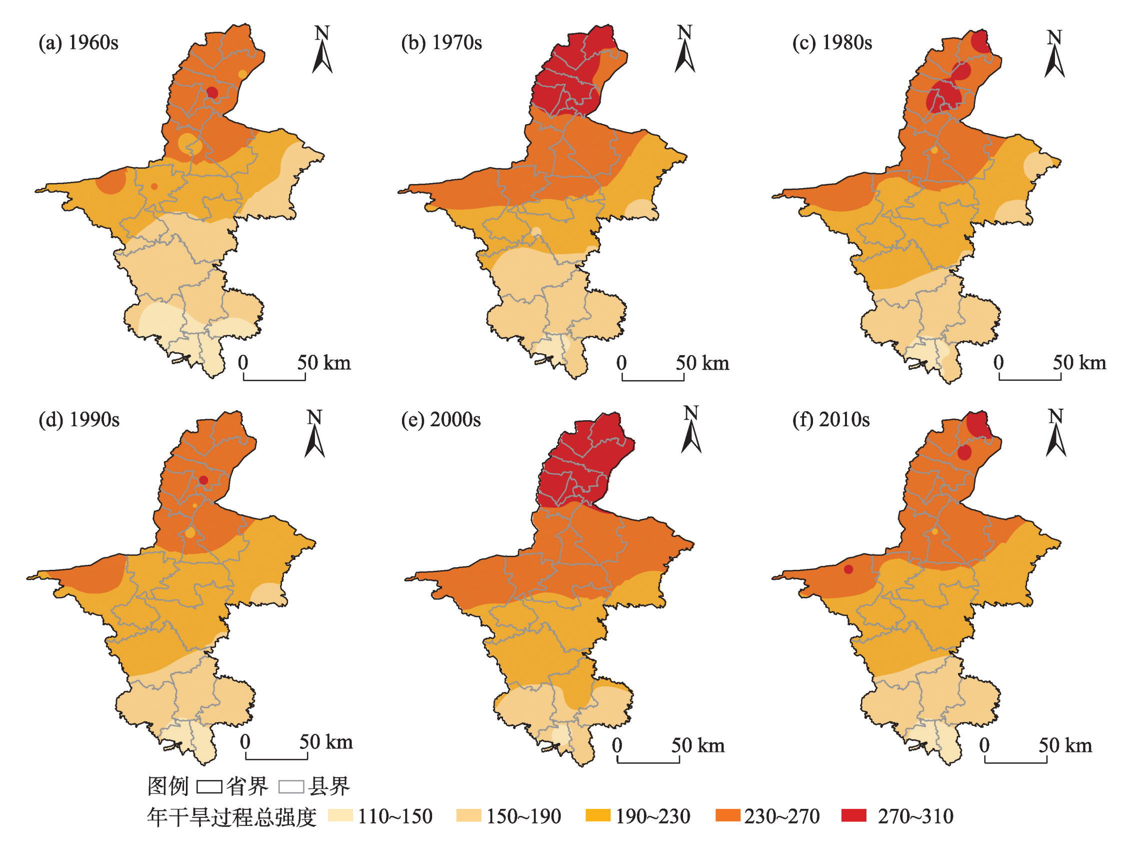


图5 年干旱过程总强度年代际空间分布

Fig. 5 Interdecadal spatial distribution of annual drought process total intensity

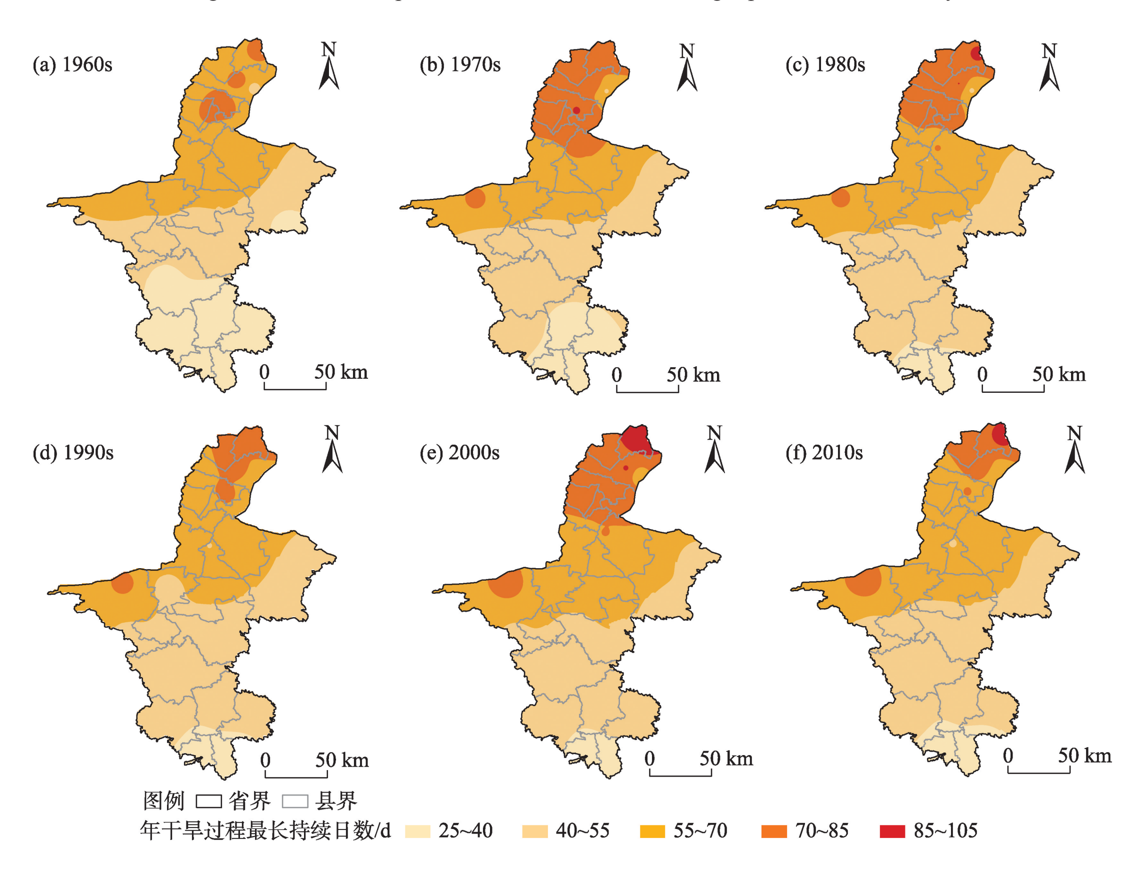


图6 年干旱过程最长持续日数年代际空间分布

Fig. 6 Interdecadal spatial distribution of annual drought process longest duration days

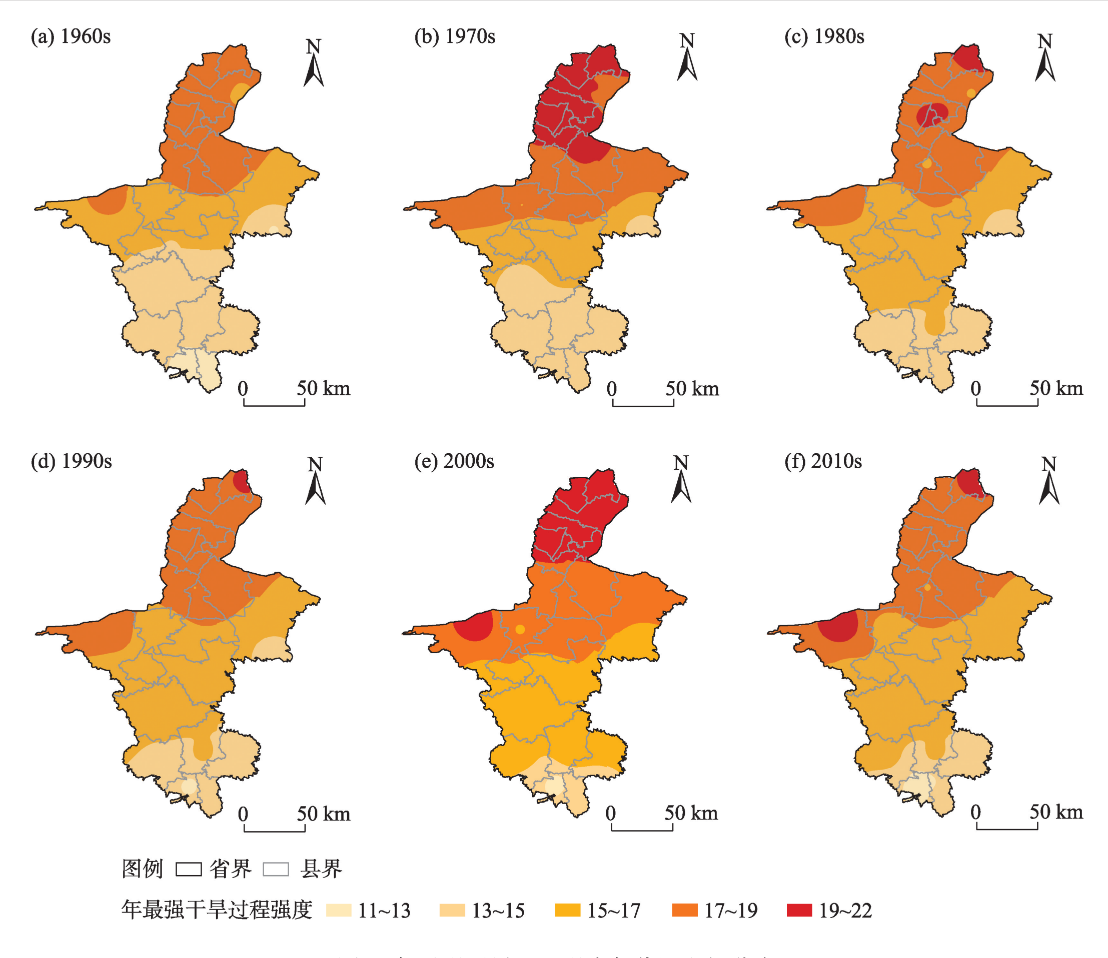


图7　年最强干旱过程强度年代际空间分布

Fig. 7　Interdecadal spatial distribution of annual strongest drought process intensity

较1970s略往北缩，0.22~0.28的区域向南扩大至海原县南部(图8c)。1990s引黄灌区致灾危险性指标0.28以上区域基本无变化，中部干旱带和南部山区致灾危险性指标在0.28以下，与1980s相比基本无变化(图8d)。2000s引黄灌区和中部干旱带北部致灾危险性指标在0.28以上，0.32以上区域向南扩大至永宁县，0.22~0.28区域向南扩展至原州区(图8e)；进入2010s中部干旱带及其以北地区致灾危险性指标明显减弱，仅利通区以北地区和沙坡头区致灾危险性指标在0.28以上(图8f)。

2.2.2　承灾体暴露度和孕灾环境脆弱性　为分析干旱事件年代际变化对宁夏主要农作物的影响，用小麦、玉米均一化后的种植面积代表承灾体暴露度指标。近40 a宁夏玉米种植面积呈明显增加趋势，1980s贺兰县以北大部、青铜峡市、沙坡头区和中宁县玉米承灾体暴露度指标在0.20~0.49之间，其余地区在0.20以下；1990s玉米承灾体暴露度指标0.20以上区域扩大到宁夏大部地区，其中引黄灌区大部及彭阳县为0.31~0.73，其余地区在0.31以下；2000s宁夏大部地区玉米承灾体暴露度指标在0.31以上，其中同心县以北大部地区在0.49以上，西吉县、隆德县和泾源县玉米承灾体暴露度指标在0.31以下；2010s随着种植面积的进一步增加，宁夏大部地区玉米承灾体暴露度指标升至0.49以上，大值中心明显向南迁移(图9a~d)。近40 a宁夏小麦种植面积整体呈减少趋势，1980s平罗县及同心县以南大部地区小麦承灾体暴露度指标在0.56以上，其他地区小于0.26；1990s上述大值区的小麦承灾体暴露度指标减小为0.34~0.56；进入2000s小麦承灾体暴露度指标大于0.34区域范围与1990s相比明显缩小；随着2010s小麦种植面积大幅减少，除同心县、西吉县外，其他地区小麦承灾体暴露度指标均在0.21以下(图9e~h)。

近40 a宁夏孕灾环境脆弱性指标总体呈增加趋势，1980s孕灾环境脆弱性指标除银川市区为0.005~0.07外，其余地区均小于0.005；1990s引黄灌区和中

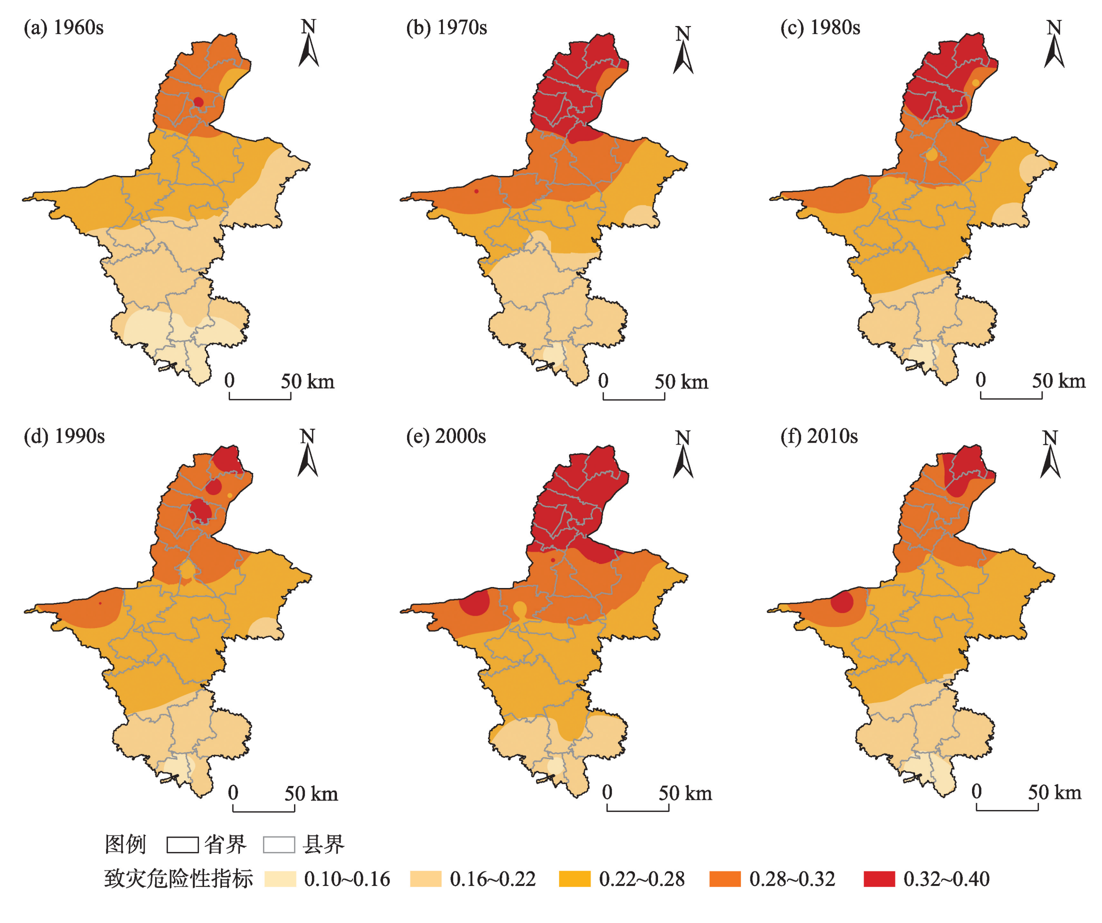


图8 干旱致灾危险性指标年代际空间分布

Fig. 8 Interdecadal spatial distribution of drought induced disaster risk index

部干旱带孕灾环境脆弱性指标明显增大,在原州区以北的大部地区大于0.005;2000s利通区以北大部地区孕灾环境脆弱性指标增大到0.07以上,其中银川市区超过0.23;2010s各地孕灾环境脆弱性指标再次明显增大,在永宁县、灵武市一线以北地区达0.23以上(图9i~l)。

2.3 小麦和玉米干旱灾害年代际综合风险评估

根据玉米和小麦干旱灾害风险评估指标计算结果,按30%、50%、70%、90%百分位进行等级划分。近40 a宁夏玉米干旱灾害风险呈增大趋势,1980s除平罗县、贺兰县、银川市区为较低风险,其他地区均为低风险;1990s中部干旱带和南部山区为低到较低风险,青铜峡市以北大部地区为中风险;进入2000s红寺堡区以北地区升至较高及以上风险,中部干旱带及南部山区大部升为中风险;2010s风险为近40 a最高,红寺堡以北地区升至高风险,其余大部均为较高风险(图10a~d)。

近40 a宁夏小麦干旱灾害风险总体也呈增大的趋势,1980s除银川市区为较低风险外,其余地区均为低风险;1990s引黄灌区、中部干旱增大为较低和中风险;2000s红寺堡区及以北地区风险等级增加最为明显,大部地区为较高以上风险,其余地区为中等以下风险;2010s较高及以上风险区域范围进一步扩大,其中银川市区及以北大部地区和红寺堡区继续为高风险,永宁县以南到隆德县以北大部变为中到较高风险(图10e~h)。

3 讨 论

20世纪80年代以来,宁夏不同地区玉米干旱灾害风险依次为引黄灌区>中部干旱带>南部山区,在中南部地区其干旱灾害风险随年代际呈增大趋势;种植面积扩大和GDP增加是造成中南部地区2010s比2000s玉米干旱灾害风险等级增大的2个主要原因。近40 a宁夏小麦干旱灾害风险具有北高南低的空间分布特点,受干旱致灾危险性、种植面积和GDP综合影响,其风险增加幅度为中部干旱带>南部山区>引黄灌区,上述因子等级均较高是2010s红

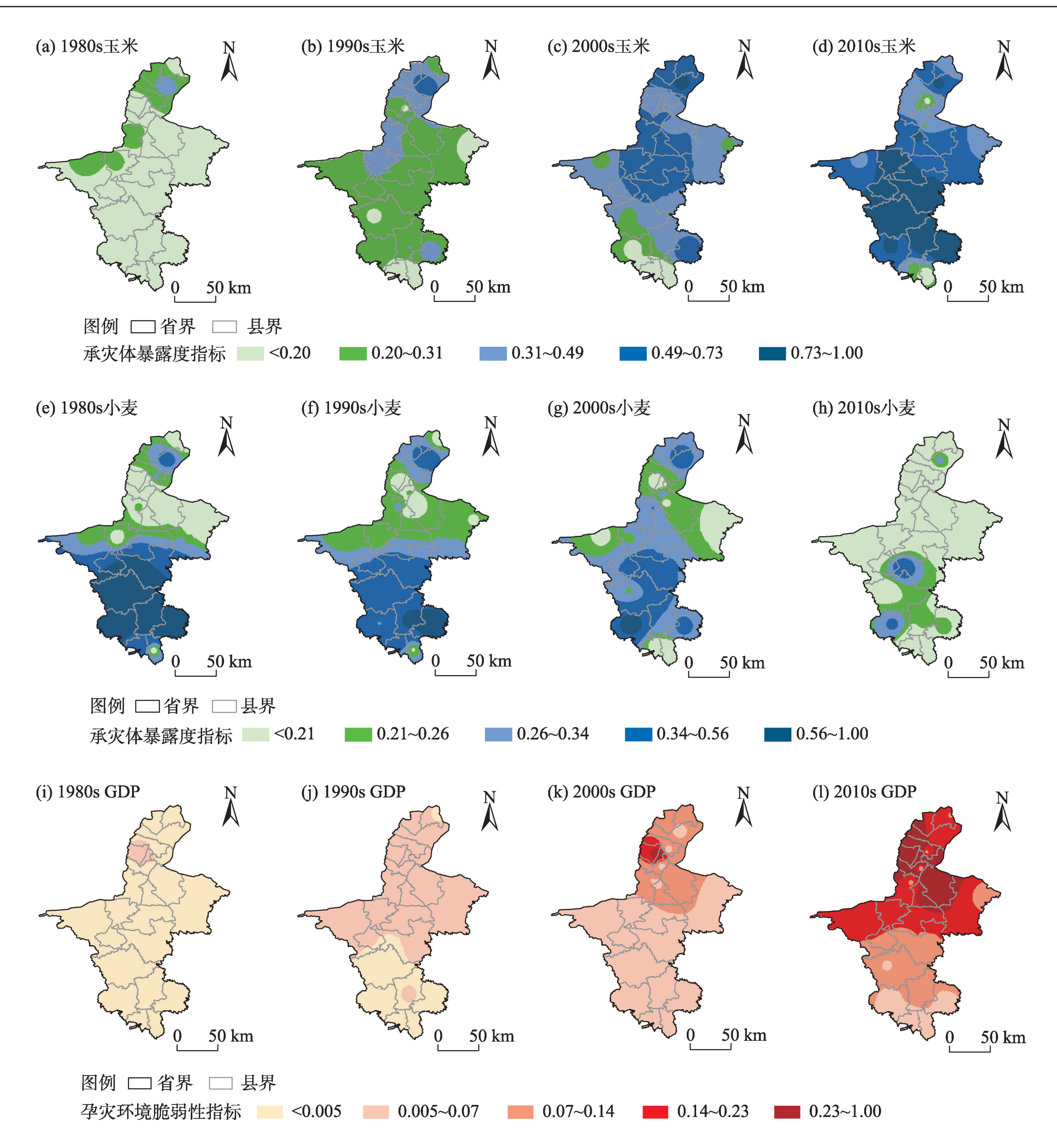


图9　承灾体暴露度和孕灾环境脆弱性指标年代际空间分布

Fig. 9　Interdecadal spatial distributions of disaster bearing body exposure and pregnant environment vulnerability

寺堡区风险明显增大的主要原因。在影响宁夏各地干旱灾害风险年代际变化的因子中，干旱致灾危险性主要受气候持续变暖的影响，承灾体暴露度(种植面积)与种植政策及作物本身适宜性有关，GDP表征的孕灾环境脆弱性增加是社会经济发展的必然趋势，因此可从以上3方面入手寻找降低干旱灾害风险的解决途径。

本文采用改进并优化的CI指数识别并建立的宁夏干旱事件及其致灾危险性指标，其总体空间分布与前人利用其他干旱指标进行研究得出的结论较为一致[16,35-36]，因考虑了干旱事件所带来的影响，故更能客观表征宁夏各地干旱实况和发展演变规律。在气候变暖、社会经济发展等多种因素影响下，得出的宁夏主要农作物干旱灾害风险不断加剧的结果与他人研究结论基本一致[37]。农作物干旱灾害风险影响因素复杂，研究未能充分考虑减灾能力、土壤类型、作物产量、减产率等因素对小麦、玉米干旱灾害风险的影响。

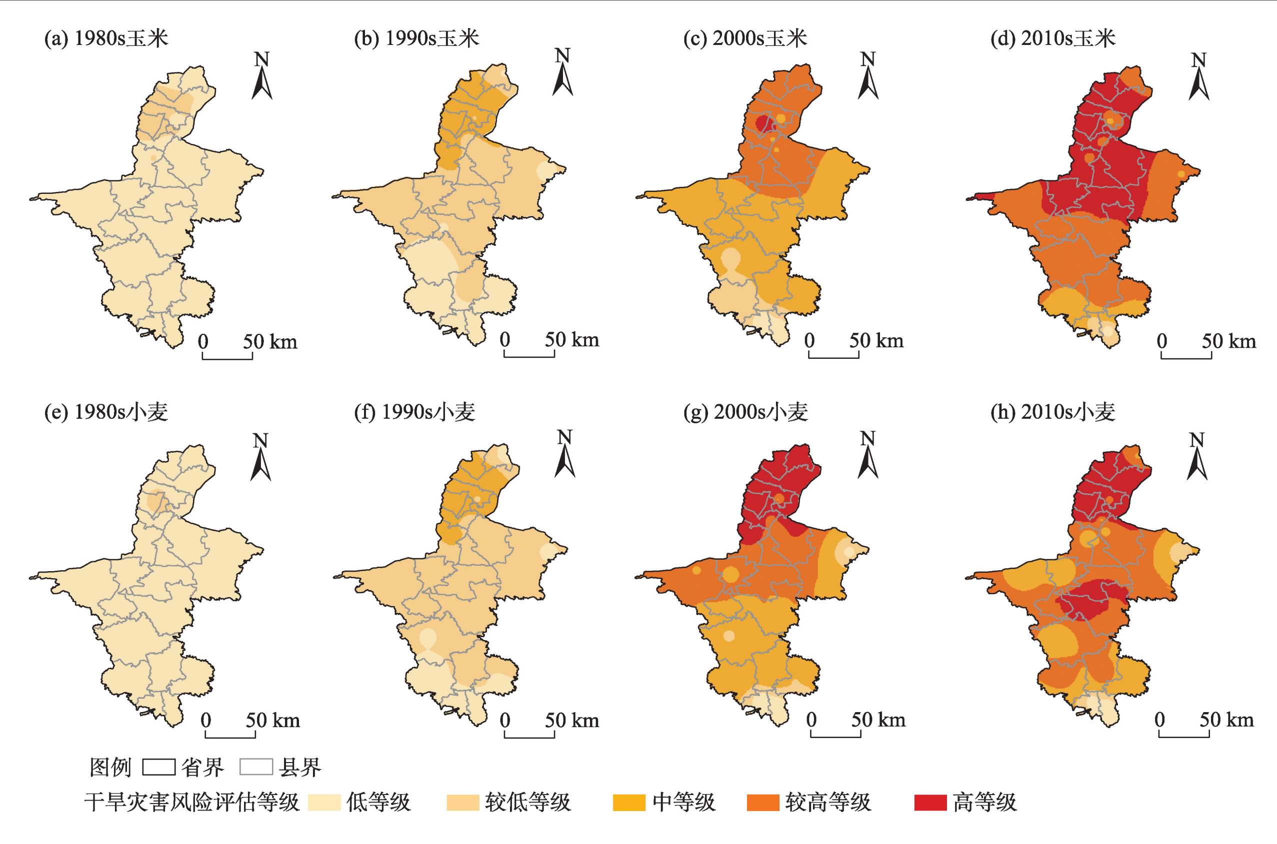


图10 玉米和小麦干旱灾害风险评估年代际空间分布

Fig. 10 Interdecadal spatial distribution of drought disaster risk assessment for corn and wheat

4 结 论

(1) 近60 a宁夏干旱事件在累积效应、持续时间以及强度上具有明显的年代际变化特征。在时间上,中北部(引黄灌区和中部干旱)、南部山区年干旱过程总强度、最长持续日数趋势分别在1970s后期、2010年前后发生由增强(多)转为减弱(少)的突变;引黄灌区、中南部(中部干旱带和南部山区)年最强干旱过程强度均值分别在1982年发生由强转弱的突变,在2010年前后发生趋势由增强转为减弱的突变。在空间上,年干旱过程总强度、年干旱过程最长持续日数、年最强干旱过程强度总体上均呈自南向北增强、增多、增强的分布特点;引黄灌区上述指标呈增加-减少-增加-减少的年代际变化趋势;中部干旱带和南部山区各指标年代际变化空间差异较大。

(2) 近60 a宁夏干旱致灾危险性指标大值区范围呈增加-减少-增加-减少的年代际变化。20世纪80年代以来,玉米干旱灾害风险等级依次为引黄灌区>中部干旱带>南部山区,在中南部地区其风险呈逐年代际增大趋势。宁夏小麦干旱灾害风险等级具有北高南低的空间分布特点,其风险增加幅度为中部干旱带>南部山区>引黄灌区。

(3) 宁夏小麦、玉米干旱灾害风险等级在近40 a里年代际变化特征明显。受气候变化、GDP增加以及种植面积波动等因素影响,宁夏小麦、玉米干旱灾害风险等级呈逐年代际往南扩大增加的演变特征。面对未来中南部水资源短缺、灌溉用水不足的挑战,建议采取提高人工增雨能力、加大抗旱工程建设、开发种植品种、调整种植结构等措施,降低玉米和小麦的干旱灾害风险等级。

参考文献(References)

[1] 丁一汇. 中国气象灾害大典·综合卷[M]. 北京: 气象出版社, 2008. [Ding Yihui. Comprehensive volume of China meteorological disaster encyclopedia[M]. Beijing: Meteorological Press, 2008.]

[2] 许靖华. 太阳、气候、饥荒与民族大迁移[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 1998, 28(4): 366-384. [Xu Jinghua. Sun, climate, famine and ethnic migration[J]. Science China (Series D): Earth Sciences, 1998, 28(4): 366-384.]

[3] 章典, 詹志勇, 林初升, 等. 气候变化与中国的战争、社会动乱和

朝代变迁[J]. 科学通报, 2004, 49(23): 2468-2474. [Zhang Dian, Zhan Zhiyong, Lin Chusheng, et al. Climate change and China's wars, social turmoil and dynastic changes[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(23): 2468-2474.]

[4] 符淙斌, 马柱国. 全球变化与区域干旱化[J]. 大气科学, 2008, 32(4): 752-760. [Fu Congbin, Ma Zhuguo. Global change and regional aridification[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(4): 752-760.]

[5] Dai A, Trenberth K E, Qian T. A global dataset of Palmer drought severity index for 1870—2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming[J]. Journal of Hydrometeorology, 2004, 5(6): 1117-1130.

[6] 马柱国, 符淙斌. 20世纪下半叶全球干旱化的事实及其与大尺度背景的联系[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 2007, 37(2): 222-233. [Ma Zhuguo, Fu Congbin. The fact of global drought in the second half of the 20th century and its connection with large-scale background[J]. Science China (Series D): Earth Sciences, 2007, 37(2): 222-233.]

[7] 马柱国, 符淙斌. 1951—2004年中国北方干旱化的基本事实[J]. 科学通报, 2006, 51(20): 2429-2439. [Ma Zhuguo, Fu Congbin. Basic facts of drought in northern China from 1951 to 2004[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(20): 2429-2439.]

[8] 张世喆, 朱秀芳, 刘婷婷, 等. 基于多维Copula的中国干旱特征及危险性分析[J]. 干旱区地理, 2022, 45(2): 333-344. [Zhang Shizhe, Zhu Xiufang, Liu Tingting, et al. Drought characteristics and risk hazard in China based on multidimensional Copula model[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(2): 333-344.]

[9] Douville H, Raghavan K, Renwick J, et al. Water cycle changes[C]//IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

[10] 中国气象局. 2020年中国气候公报[R]. 北京: 气象出版社, 2020. [China Meteorological Administration. 2020 China Climate Bulletin[R]. Beijing: Meteorological Press, 2020.]

[11] 袁星, 王钰淼, 张苗, 等. 关于骤旱研究的一些思考[J]. 大气科学学报, 2020, 43(6): 1086-1095. [Yuan Xing, Wang Yumiao, Zhang Miao, et al. A few thoughts on the study of flash drought[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2020, 43(6): 1086-1095.]

[12] 张强, 朱飙, 杨金虎, 等. 西北地区气候湿化趋势的新特征[J]. 科学通报, 2021, 66(增刊2): 3757-3771. [Zhang Qiang, Zhu Biao, Yang Jinhu, et al. New characteristics about the climate humidification trend in northwest China[J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(Suppl. 2): 3757-3771.]

[13] 张强, 韩兰英, 郝小翠, 等. 气候变化对中国农业旱灾损失率的影响及其南北区域差异性[J]. 气象学报, 2015, 73(6): 1092-1103. [Zhang Qiang, Han Lanying, Hao Xiaocui, et al. On the impact of the climate change on the agricultural disaster loss caused by drought in China and the regional differences between the North and the South[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2015, 73(6): 1092-1103.]

[14] 王素萍, 张存杰, 李耀辉, 等. 基于标准化降水指数的1960—2011年中国不同时间尺度干旱特征[J]. 中国沙漠, 2014, 34(3): 827-834. [Wang Suping, Zhang Cunjie, Li Yaohui, et al. Analysis of multi-timescale drought variation based on standardized precipitation index in China during 1960—2011[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(3): 827-834.]

[15] Zhang Q, Wang Y. Distribution of hazard and risk caused by agricultural drought and flood and their correlations in summer monsoon-affected areas of China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2022, 149(3-4): 965-981.

[16] 韩兰英, 张强, 马鹏里, 等. 气候变暖背景下黄河流域干旱灾害风险空间特征[J]. 中国沙漠, 2021, 41(4): 225-234. [Han Lanying, Zhang Qiang, Ma Pengli, et al. Characteristics of drought disasters risk in the Yellow River Basin under the climate warming[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(4): 225-234.]

[17] 夏普明. 中国气象灾害大典·宁夏卷[M]. 北京: 气象出版社, 2007. [Xia Puming. Ningxia volume of China meteorological disaster encyclopedia[M]. Beijing: Meteorological Press, 2007.]

[18] 梁旭, 冯建民, 张智, 等. 宁夏干旱气候变化及其成因研究[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(8): 68-74. [Liang Xu, Feng Jianmin, Zhang Zhi, et al. A study on drought climate change and its causes[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 21(8): 68-74.]

[19] 李红英, 张晓煜, 王静, 等. 基于CI指数的宁夏干旱致灾因子特征指标分析[J]. 高原气象, 2014, 33(4): 995-1001. [Li Hongying, Zhang Xiaoyu, Wang Jing, et al. Analysis of drought disasters-causing factors in Ningxia based on CI index[J]. Plateau Meteorology, 2014, 33(4): 995-1001.]

[20] 张耀宗, 张勃, 刘艳艳, 等. 1960—2012年宁夏强干旱时空格局及影响因素分析[J]. 灾害学, 2016, 31(1): 120-127. [Zhang Yaozong, Zhang Bo, Liu Yanyan, et al. Spatial and temporal pattern of strong drought and its influence factors in Ningxia from 1960 to 2012[J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(1): 120-127.]

[21] 马小燕, 朱晓雯, 赵金涛, 等. 基于SPEI的宁夏沿黄城市带干旱特征及驱动性分析[J]. 水土保持研究, 2022, 29(5): 364-373. [Ma Xiaoyan, Zhu Xiaowen, Zhao Jintao, et al. Analysis of drought characteristics and driving forces in the urban belt along the Yellow River in Ningxia based on SPEI[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(5): 364-373.]

[22] 王洁, 李王成, 李晨, 等. 基于SPI指数的宁夏干旱特征[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(3): 528-538. [Wang Jie, Li Wangcheng, Li Chen, et al. Drought characteristics in Ningxia based on standardized precipitation index[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(3): 528-538.]

[23] 裴晓蓉, 王文, 杨建玲, 等. 基于精细资料的宁夏春季干旱特征分析[J]. 气象科技, 2018, 46(3): 524-531. [Pei Xiaorong, Wang Wen, Yang Jianling, et al. Distribution characteristics of spring droughts based on high-resolution data in Ningxia[J]. Meteorologi-

cal Science and Technology, 2018, 46(3): 524-531.]

[24] 张彦龙, 刘普幸, 王允. 基于干旱指数的宁夏干旱时空变化特征及其Morlet小波分析[J]. 生态学杂志, 2015, 34(8): 2373-2380. [Zhang Yanlong, Liu Puxing, Wang Yun. Temporal and spatial variations of the drought in Ningxia based on aridity index and Morlet wavelet analysis[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(8): 2373-2380.]

[25] 国家气候中心. GB/T20481-2006. 气象干旱等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006. [National Climate Centre, China Meteorological Admistration. GB/T20481-2006. Meteorological drought levels[S]. Beijing: China Standards Press, 2006.]

[26] 王素艳, 郑广芬, 杨洁, 等. 几种干旱评估指标在宁夏的应用对比分析[J]. 中国沙漠, 2012, 32(2): 517-523. [Wang Suyan, Zheng Guangfen, Yang Jie, et al. Application of three drought evaluation indices in Ningxia[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(2): 517-523.]

[27] 王素艳, 郑广芬, 李欣, 等. CI综合气象干旱指数在宁夏的本地化修正及应用[J]. 干旱气象, 2013, 31(3): 561-569. [Wang Suyan, Zheng Guangfen, Li Xin, et al. Modification of CI comprehensive meteorological drought index and its application in Ningxia[J]. Journal of Arid Meteorology, 2013, 31(3): 561-569.]

[28] 中国气象局. QX/T597-2021. 区域性干旱过程监测评估方法[S]. 北京: 气象出版社, 2021. [China Meteorological Administration. QX/T597-2021. Methods for monitoring and evaluating regional drought processes[S]. Beijing: Meteorological Press, 2021.]

[29] 张琴. 农业干旱灾害风险评估与应用研究——基于POT模型[D]. 青岛: 青岛大学, 2019. [Zhang Qin. Research on agricultural drought disaster risk assessment and application based on POT model[D]. Qingdao: Qingdao University, 2019.]

[30] 李菲菲, 周霞, 周玉玺. 西北地区农业干旱脆弱性评估及时空分布特征[J]. 干旱区研究, 2023, 40(4): 663-669. [Li Feifei, Zhou Xia, Zhou Yuxi. Vulnerability assessment and spatiotemporal distribution of agricultural drought in northwest China[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(4): 663-669.]

[31] 韩兰英, 张强, 马鹏里, 等. 中国西南地区农业干旱灾害风险空间特征[J]. 中国沙漠, 2015, 35(4): 1015-1023. [Han Lanying, Zhang Qiang, Ma Pengli, et al. Spatial characteristics of comprehensive risk of agricultural drought disaster in southwesterm China[J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(4): 1015-1023.]

[32] 刘晓冉, 康俊, 王颖, 等. 基于GIS的重庆地区不同季节干旱灾害风险评估与区划[J]. 自然灾害学报, 2019(2): 92-100. [Liu Xiaoran, Kang Jun, Wang Ying, et al. Assessment and regionalization on drought disaster risk of different season in Chongqing area based on GIS[J]. Journal of Natural Disasters, 2019(2): 92-100.]

[33] 宋柏泱, 陈报章. 巴基斯坦瓜达尔港地区干旱灾害风险评估[J]. 地理研究, 2022, 41(8): 2251-2264. [Song Boyang, Chen Baozhang. Drought risk assessment in Gwadar Port, Pakistan[J]. Geographical Research, 2022, 41(8): 2251-2264.]

[34] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007. [Wei Fengying. Modern climate statistical diagnosis and prediction techniques[M]. Beijing: Meteorological Press, 2007.]

[35] 肖玮钰. 西北地区春玉米气候适宜性区划和干旱风险评估[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013. [Xiao Weiyu. Climate suitability zoning and drought risk assessment of spring corn in the northwest region[D]. Nanjing University of Information Science and Technology, 2013.]

[36] 李红英, 张晓煜, 袁海燕, 等. 宁夏农业干旱灾害综合风险分析[J]. 中国沙漠, 2013, 33(3): 882-887. [Li Hongying, Zhang Xiaoyu, Yuan Haiyan, et al. Assessment of agricultural drought disaster risk in Ningxia[J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(3): 882-887.]

[37] 包阿茹汗. 宁夏玉米和小麦干旱风险评价研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018. [Bao Aruhan. Study on drought risk assessment of corn and wheat in Ningxia[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018.]

Interdecadal changes and risk assessment of drought events in Ningxia from 1961 to 2020

WANG Dai[1,2], CUI Yang[1,3], WANG Suyan[1,2], ZHANG Wen[1,2]

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk Management of Characteristic Agriculture in Arid Regions, China Meteorological Administration, Yinchuan 750002, Ningxia, China; 2. Ningxia Hui Autonomous Region Climate Center, Yinchuan 750002, Ningxia, China; 3. The Institute of Meteorological Science of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750002, Ningxia, China)

Abstract: Utilizing meteorological observation data from 20 national meteorological stations in Ningxia, China, spanning from 1961 to 2020, along with socioeconomic statistical data from the past four decades, this study established indicators for drought process events in Ningxia. Subsequently, it developed an interdecadal drought disaster risk assessment model in line with disaster risk assessment theory. The study analyzed the interdecadal variation characteristics and regional differences of drought events and the associated risks to major crops in Ningxia, aiming to identify the factors influencing regional crop interdecadal risk changes. The findings are as follows: (1) The cumulative effect, duration, and intensity indicators of drought events in Ningxia over the past six decades exhibit distinct interdecadal variation characteristics, with notable shifts in trends and mean values in the central northern region and southern mountainous areas around 1980 and 2010, respectively. Additionally, the spatial distribution of high-value areas for drought event and disaster risk indicators demonstrated a pattern of initial increase, followed by a decrease, another increase, and a final decrease over the decades. (2) Since the 1980s, the risk levels of corn drought disasters in Ningxia's regions, in descending order, are the Yellow River irrigation area, the central arid zone, and the southern mountainous area. Influenced by the continuous expansion of the corn planting area and the growth of the gross domestic product (GDP), the drought risk levels in the central and southern regions have seen an interdecadal increase. Moreover, the increase amplitude in wheat drought disaster risk levels, in descending order, are the central arid zone, the southern mountainous area, and the Yellow River irrigation area. The primary reasons for the heightened drought risk in parts of the central arid zone during the 2010s include the confluence of high disaster risk, wheat planting area, and GDP. (3) Given the future challenges of water scarcity and inadequate irrigation in Ningxia's central and southern regions, it is advisable to adopt measures such as enhancing artificial rainfall capabilities, developing new crop varieties, and encouraging farmland returning to forestry and grassland or migration to mitigate the disaster risk. These strategies aim to reduce the induced disaster risk, disaster bearing body exposure and pregnant environment vulnerability, thereby lowering the drought disaster risk levels for local corn and wheat production. The insights from this analysis offer a scientific foundation for the region's strategic agricultural planning, efficient water use, drought mitigation, and disaster response efforts, contributing to the ecological protection and high-quality development initiatives in the Yellow River Basin of Ningxia.

Key words: drought events; interdecadal changes; disaster risk assessment; Ningxia